

**М. В. Майсурадзе\*, М. А. Рыжков, А. А. Куклина**

Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург

\*m.v.maisuradze@urfu.ru

## **МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННОЙ СТАЛИ 25Г2С2Н2МА**

Изучены механические свойства стали 25Г2С2Н2МА после традиционной закалки и отпуска и изотермической закалки в диапазоне температур бейнитного превращения. Показано, что в случае традиционной термической обработки максимальная ударная вязкость ( $130 \text{ Дж/см}^2$ ) может быть достигнута после высокотемпературного отпуска ( $600^\circ\text{C}$ ), прочность при этом составляет  $850\text{--}950 \text{ МПа}$ . В результате изотермической обработки было достигнуто сочетание высокой прочности (более  $1300 \text{ МПа}$ ), относительного удлинения (до  $15\%$ ) и ударной вязкости ( $115 \text{ Дж/см}^2$ ).

*Ключевые слова:* сталь, механические свойства, микроструктура, ударная вязкость, прочность, изотермическая закалка, бейнит.

**M. V. Maisuradze, M. A. Ryzhkov, A. A. Kuklina**

## **MECHANICAL PROPERTIES OF THE HEAT TREATED HY-TUF STEEL**

The mechanical properties of the HY-TUF steel were studied after conventional quenching and tempering and austempering in the bainite transformation temperature range. It is shown that the highest impact toughness for the case of the conventional oil quenching and tempering ( $130 \text{ J/cm}^2$ ) can be achieved after the high temperature tempering ( $600^\circ\text{C}$ ) which also leads to the tensile strength level  $850\text{--}950 \text{ MPa}$ . The combination of high tensile strength (above  $1300 \text{ MPa}$ ), elongation (up to  $15\%$ ) and impact toughness ( $110 \text{ J/cm}^2$ ) is obtained after the austempering at low transformation temperature.

*Key words:* steel, mechanical properties, microstructure, impact toughness, strength, austempering, bainite.

**В**настоящее время одной из проблем машиностроения является повышение надежности при одновременном уменьшении массы деталей [1, 2]. Поэтому сталь для производства таких деталей должна удовлетворять следующим требованиям: суммарное содержание легирующих элементов не более  $8 \text{ мас. \%}$ , достаточ-

ная прокаливаемость, высокая прочность при высокой пластичности и вязкости. Сталь марки 25Г2С2Н2МА отвечает этим требованиям. Данная сталь обычно используется для производства деталей самолетов, горного оборудования и других тяжело нагруженных деталей [3, 4]. В большинстве случаев механические свойства деталей из стали марки 25Г2С2Н2МА достигаются после традиционной закалки и отпуска. Настоящее исследование посвящено исследованию возможности повышения ударной вязкости стали марки 25Г2С2Н2МА при сохранении высокой прочности путем реализации изотермической закалки в температурной области формирования бейнита.

Температура аустенитизации стали марки 25Г2С2Н2МА составляла 925 °С [5] (выдержка 40 мин). Охлаждение при традиционной закалке производилось в индустриальном масле И20А (40–60 °С). Отпуск производили при температуре 200–600 °С в течение 3 ч. Изотермическая закалка производилась в печи-ванне с расплавом соли (50 % KNO<sub>3</sub>, 50 % NaNO<sub>3</sub>). Температура изотермической выдержки составляла 330–430 °С, время выдержки — 60 мин. После выдержки образцы охлаждали в закалочном масле.

Механические свойства стали марки 25Г2С2Н2МА после закалки в масло и отпуска при температуре 200–600 °С представлены на рис. 1. При температуре отпуска 400 °С, в исследуемой стали наблюдалась отпускная хрупкость. Ударная вязкость при этой температуре отпуска составляла 30–35 Дж/см<sup>2</sup>. Повышение температуры отпуска до 600 °С обеспечило увеличение ударной вязкости до 130–140 Дж/см<sup>2</sup>, но при этом прочность стали снизилась от 1400 до 950 МПа.

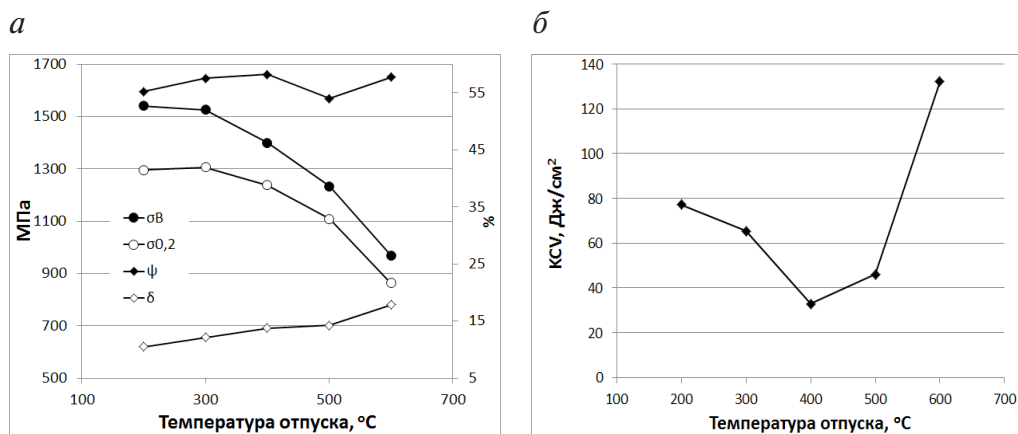


Рис. 1. Механические свойства стали 25Г2С2Н2МА после закалки (925 °С, 40 мин, масло) и отпуска:

*а* — испытание на растяжение; *б* — испытание на ударную вязкость

После изотермической закалки при 400 и 430 °С, в микроструктуре стали марки 25Г2С2Н2МА присутствует верхний бейнит и мартенсит, образовавшийся при окончательном охлаждении в масле (рис. 2, *а*). Снижение температуры выдержки до 370 °С привело к образованию нижнего бейнита. Микроструктура, полученная после изотермической закалки ниже температуры  $M_n$  при 330 °С (рис. 2, *б*), содержит пакеты «первичного» мартенсита (образовавшегося при охлаждении до температуры выдержки) и нижнего бейнита. Рентгеноструктурный анализ также показал наличие 12–18 % остаточного аустенита в микроструктуре стали 25Г2С2Н2МА после изотермической закалки в диапазоне температур 330–430 °С.

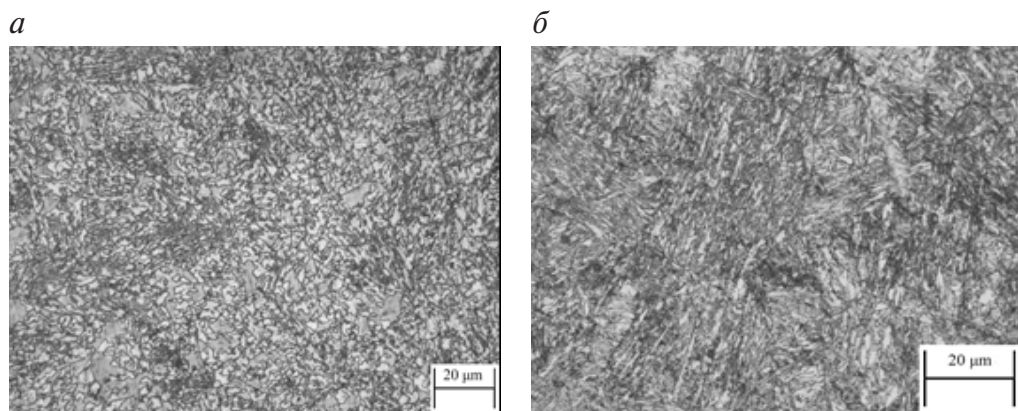


Рис. 2. Микроструктура стали 25Г2С2Н2МА после изотермической выдержки при температуре 430 °С (*а*) и 330 °С (*б*)

Ударная вязкость верхнего бейнита, образовавшегося в результате изотермической выдержки при температуре 400–430 °С, оказалась низкой (15–20 Дж/см<sup>2</sup>), несмотря на значительное содержание остаточного аустенита (до 15–18 %). Причина данного явления заключается в выделении карбидов из остаточного аустенита в процессе изотермической выдержки, приводящем к уменьшению в нем концентрации углерода. Чем ниже концентрация углерода, тем ниже устойчивость остаточного аустенита, вследствие чего хрупкий мартенсит образуется при более низких нагрузках.

Снижение температуры изотермической выдержки до 370 °С обеспечило более высокую ударную вязкость (75 Дж/см<sup>2</sup>) вследствие образования некоторого количества нижнего бейнита, но прочность уменьшилась с 1300–1400 МПа (при температуре выдержки 400–430 °С) по 1180 МПа. Снижение прочности обусловлено более полным бейнитным превращением при температуре 370 °С и, как следствие, меньшим

количеством мартенсита в структуре стали. Дальнейшее понижение температуры выдержки ниже  $M_n$  (до 330 °С) обеспечило наилучшее сочетание высокой ударной вязкости (115 Дж/см<sup>2</sup>) и прочности (1300 МПа). Увеличение ударной вязкости объясняется отсутствием карбидов или верхнего бейнита в микроструктуре стали и высокой устойчивостью обогащенного углеродом остаточного аустенита. Повышенная прочность обусловлена образованием некоторого количества «первичного» мартенсита и TRIP-эффектом во время пластической деформации.

Таким образом, сталь марки 25Г2С2Н2МА после низкотемпературной изотермической закалки сочетает высокую прочность и высокую ударную вязкость, что позволяет уменьшить сечение деталей для обеспечения требуемой прочности и надежности.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Advanced high strength steel (AHSS) development through chemical patterning of austenite / W. W. Sun [et al.] // Scripta Materialia. 2018. V. 146. P. 60–63.
- 2 Kanisawa H., Ochi T. Weight Reduction of Automotive Parts by Use of High strength Steel Bars and Rods // Nippon Steel Technical Report. 2000. V. 81. P. 22–28.
- 3 Effects of laser peening on fatigue life in an arrestment hook shank application for Naval aircraft / M. J. Leap [et al.] // International Journal of Fatigue. 2011. V. 33. P. 788–799.
- 4 Mackay T. L., Alperin B. J., Bhatt D. D. Near-threshold fatigue crack propagation of several high strength steels // Engineering Fracture Mechanics. 1983. V. 18. P. 403–416.
- 5 Превращения переохлажденного аустенита в перспективной высокопрочной стали при непрерывном охлаждении / М. В. Майсурадзе [и др.] // МиТОМ. 2017. № 8. С. 15–19.